

上向流式 連續 逆洗 濾過를 이용한 養魚場 循環水 再利用 II. 여과사의 표면처리에 의한 세균 및 바이러스 처리율 검토

박종호* · 조규석 · 황규덕 · 김이오
충청북도내 수면연구소

Recycling Water Treatment of Aquaculture by Using DynaSand Filter II. Effect of Coating on Removal of Bacteria and Virus in Sand Columns

Jong-Ho Park*, Kyu-Seok Cho, Gyu-Deok Hwang and Lee-Oh Kim
Department of Inland Fisheries Research Institute, Chung Cheong Buk-Do, Chung-ju 380-250, Korea

To improve the efficiency of removal of bacteria and virus with DynaSand Filters used for treatment of recycling wastewater from aquaculture, effect of biofilm formation on bacterial transport through coated sand was estimated. At the neutral pH (pH 7.0), the coated sand was positive of zeta potential (surface charge). Column experiments were also carried out to test the effect of uncoated sand as well as coated sand with Al and Fe. The coated sand influenced more significantly the surface properties, adsorption and transport than the uncoated sand. The leaching batch system investigated for synthetic water showed concentrations of 7.47, 4.80, 20.89 and 7.23 mg/L for the uncoated sand, coated sand with Al, Fe and Al+Fe, respectively. Hence there are significant differences among the tested coatings with reference to bacterial transport and surface properties.

Keywords: Dyna sand filter, Biofilm, Coated sand, Zeta potential

서 론

수산양식에 있어 순환여과식 시스템의 수처리는 양식 생산력 증대를 위해 반드시 필요한 과정으로서 사료찌꺼기와 어류 배설물에 의해 발생하는 암모니아 제거를 주요 처리 대상으로 한다. 이러한 순환여과식 시스템의 필요성이 점차 확대되는 시점에서 순환되는 사육수의 수질을 향상시키고 양식어류에 적합한 환경을 유지할 수 있는 기술개발이 선행되어야 한다.

현재 국내 및 국외에서 안정적인 양식산업의 발전을 위한 해결책으로 양어용수를 재사용하는 순환여과 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Kim, 1980; Rogers et al., 1985; Jewell et al., 1990; Nijhof et al., 1990; Oh et al., 1997; Lee et al., 1999; Oh et al., 1999; Lee et al., 2000). 하지만, 이러한 순환여과식 시스템에서는 질병이 발생했을 경우 대처할 수 있는 방안이 미비하다는 단점이 있다. 따라서 양어용수를 재사용할 경우 여과과정을 거친 처리수는 부유성 고형물만 제거되어서는 안되며, 질병의 예방을 위한 병원성 미생물의 제거도 같이 이루어져야 한다. 이러한 병원성 미생물은 여과만으로 제거하기가

어려운데 이는 이들이 중성 pH에서 음이온성을 띄고 있고 (Marshall, 1976; Loder and Liss, 1985), 여과사도 음이온성을 띄고 있기 때문이다. 이와 같이 음이온성을 띤 부유물을 여과로 제거하기 위해 여과사를 양이온성이 되게 하는 것으로 여과효율이 크게 증가되는 것이 여러 연구자들에 의해 보고되었다 (Lichtenberg et al., 1985; Bales et al., 1991; Farrah and Preston, 1991; Fontes et al., 1991; Ho et al., 1991; Scholl and Harvey, 1992; McCaulou et al., 1994; Stenkamp and Benjamin, 1994). 여과사를 금속염으로 코팅시키는 방법을 이용하면 상수 및 하·폐수 여과시 세균, 바이러스 및 탁도를 현저히 줄일 수 있다고 여러 연구자들에 의해 보고되고 있다(Jenneman et al., 1985; McCoy et al.; Gerba et al., 1988; Mills et al., 1994; McCaulou et al., 1995; Harvey et al., 1995). 코팅기술은 aging effect를 극복할 수 있고 50일 이상 운전하여도 바이러스 등 미세 부유물의 제거효율이 높다고 보고 되어졌다(McCaulou et al., 1995). 여과재료 표면에 작용하는 물리, 화학적 성질에 따라 여과재료의 표면작용력(surface interaction forces)은 탁질제거 효율에 상당한 영향을 미친다. 따라서 점차적으로 악화되는 양어장의 수질 상황과 수산용약품 사용에 따른 약품의 수중 잔류량 증가로 이에 대한 수질의 악영향이 알려짐에 따라, 과거의 단순

*Corresponding author: jhpark@cb21.net

한 방법인 탁도를 기준으로 탁질의 제거에만 노력을 기울일 것이 아니라, 여과재료의 물리적 및 화학적, 특히 표면화학적 (surface chemistry)인 성질을 이용한 방법으로 여과가 이루어져야 하겠다.

본 연구에서는 상향류식 연속 역세여과에서 양어장 순환수를 재이용할 경우 부유성 고형물 뿐만 아니라 질병의 예방을 위한 세균 및 바이러스 등의 병원성 미생물의 제거도 같이 이루어지도록 하는 처리 방법을 개발하고자 시도하였다. 이 과정에서 실험실 규모의 컬럼에서 여과재료의 코팅 유·무에 따른 오염물 및 병원성 미생물의 제거능을 평가하였고 여과기의 동적 거동 관찰을 통해 적정 운전인자를 도출하고자 하였다.

재료 및 방법

실험재료

여과재료의 코팅(coating)

본 실험에서 이용된 여과재료는 4가지로 구분할 수 있다. Non-coating, Al coating, Fe coating 및 Al+Fe coating 이다. Coating을 위한 모래는 적당한 크기로 선별하기 위하여 No. U. S. Standard #25 시브를 통과한 20×30 mesh 정도의 모래로 직경은 600~700 μm 사이의 입자를 이용하였다. 시브를 통과한 모래는 상등액이 깨끗할 때까지 탈이온화된 증류수(deionized water)로 세척 후 공기건조 하였다. Al coating을 위하여 건조된 모래를 이용하였으며, 건조된 모래는 폴리프로필렌 접시에 넣고 1 M AlCl₃ 용액으로 채웠다. 그리고 5분 동안 모래와 용액이 잘 섞이게 교반을 하였고, 교반 후 상등액은 버리고 24시간 동안 공기 건조(자연건조)시켰다. 건조된 모래는 3 M NH₄OH 용액으로 채운 다음 5분 동안 교반하였고, 남은 용액은 버리고 24시간 동안 공기 건조한 후 건조된 모래는 탈이온화된 증류수를 이용하여 상등액의 전기전도도(conductivity)가 약 5 Ω 정도 까지 일정하게 유지될 때까지 다시 세척한 후 공기 건조시켰다. Fe coating의 경우, 건조된 모래를 이용하여 폴리프로필렌 접시에 넣고 0.5 M FeCl₃ 용액으로 채운 다음 5분 동안 교반한 후 상등액은 버리고 24시간 동안 공기 건조시켰다. 건조된 모래는 3 M NH₄OH 용액으로 채운 다음 5분 동안 교반시켰고, 남은 용액은 버리고 24시간 공기 건조시켰다. 건조된 모래는 탈이온화된 증류수를 이용하여 상등액의 전기전도도가 일정할 때까지 세척한 후 공기 건조시켰다. Al+Fe coating의 경우, 건조된 모래를 폴리프로필렌 접시에 넣고 0.5 M FeCl₃ 용액으로 채운 후 5분 동안 교반하고, 상등액은 버리고 24시간 공기 건조시켰다. 건조된 모래는 3 M NH₄OH 용액으로 채운 다음 5분 동안 교반한 후 남은 용액은 버리고 24시간 공기 건조 시켰다. 모래는 폴리프로필렌 접시에 넣고 1 M AlCl₃ 용액으로 채운다. 그리고 5분 동안 교반시킨 후 상등액은 버리고 밤새 공기 건조 시켰다. 건조된 모래는 3 M NH₄OH 용액으로 채운 다음 5분 동안 교반한 뒤 남은 용액은 버리고 24시간 동안 공기 건조 시켰다. 건조된

모래는 탈이온화된 증류수를 이용하여 상등액의 전기전도도가 일정할 때 까지 세척하고 다시 공기 건조 시켰다.

여과재료를 이용한 연속실험

건조 모래는 모래의 손실을 막기 위해 한쪽 방향에서 유리섬유를 이용하여 직경(I.D.) 1.5 cm, 0.5 m 길이의 glass 컬럼에 채웠다. 각각의 컬럼에 non-coating, Al coating, Fe coating 및 Al+Fe coating 한 여과재료를 채웠고 컬럼에 공기를 배제시키기 위해 CO₂를 주입하였고, 탈이온화된 증류수를 상부에서 부터 채웠다. 필요한 경우, 컬럼의 모래 높이를 동일하게 유지하기 위하여 컬럼 상부에서 모래를 첨가하였다. 이때 채워진 모래의 공극은 대략 40%이다.

컬럼에 주입되는 유입수의 주입방법은 상향류 형태를 이용하였다. 유입수는 합성폐수를 이용하였으며 이 때 농도는 10 mg/L이었다. 실험에 이용된 컬럼의 재질은 유리 컬럼(glass columns)이었으며, 각각의 컬럼의 유속은 peristaltic pumps를 이용하여 10 mL/min으로 조절하였다. 각각의 컬럼은 초기에 20 공극 부피(pore volumes) 정도의 여과-살균된 증류수를 이용하여 세척하였다. 그리고 전체 실험 기간에 마그네틱 교반기를 이용하여 혼합된 유입수를 컬럼에 주입하였다. 컬럼을 통과한 유출수는 각각의 시료채취 시점에서 채취하였다.

실험방법

본 연구는 여과재료의 표면특성 변화의 영향을 관찰하기 위한 것으로서 크게 세 가지로 나누어 실험을 수행하였다.

첫 번째 실험은 준비된 모래, 즉 non-coating, Al coating, Fe coating 및 Al+Fe coating 모래를 이용하여 흡착실험을 하였다. 표면특성 변화에 따른 영향을 관찰하기 위하여 여과재료를 이용하여 각각의 pH 4.22, 5.12, 7.58 및 10.04에서 흡착실험을 하였고, 여과사의 표면처리에 의한 처리율을 검토하기 위하여 여과사를 aluminum hydroxide와 iron-aluminum hydroxide로 각각 코팅한 것과 코팅을 하지 않은 것으로 나누고 zeta potential의 변화를 살펴보기 위하여 pH를 3.70에서 8.70으로 변화시켰으며, 또한 코팅방법에 따른 영향을 알아보기 위하여 air drying한 것과 heat drying한 것으로 나누어 차이를 알아보았다.

두 번째 실험은 위의 실험에서 사용된 여과재료를 이용하여 탈착 실험 후 재흡착 실험을 하였다. 재흡착 실험에서 이용된 여과재료는 다음과 같다. 하나는 pH 7.55에서 흡착 실험을 하고 pH 4.40인 증류수를 이용하여 탈착시키고 다시 pH 7.55에서 재흡착 실험을 하였다. 그리고 다른 하나는 pH 10.04에서 흡착실험을 한 후 pH 4.40인 증류수를 이용하여 탈착 실험한 후 pH 7.44에서 흡착 실험하였다.

세 번째 실험은 첫 번째 실험에서 사용된 여과재료를 이용하여 탈착 실험을 하였다. 실험에 이용된 coating 모래는 흡착 실험을 하고 난 후의 여과재료를 이용하였다. 탈착 실험은 회분식 형태로 운영하였으며 각각의 실험은 pH 4.10, 5.23, 7.10, 8.32, 9.95 및 11.00에서 하였다. 그리고 이용된 모래의 양은 무

계로 15 g, 탈착시간(leaching time)은 1시간으로 하였으며, 실험 측정을 위한 샘플 양은 20 mL를 채취하였다.

이상의 실험에서 시료 채취는 각각의 컬럼을 통과한 후 일정 시간 간격으로 채취하여 0.45 μm membrane filter로 여과하여 이용하였다. 측정 항목은 UV-Vis spectrophotometer를 이용하여 흡광도(254 nm)를 측정하였으며, 탁도(turbidity)는 DRT100B (HF scientific inc.)를 이용하였다. 또한, 알칼리도(alkalinity)는 Standard methods(AHPA, 1989)로 측정하였다.

결과 및 고찰

모래 표면처리에 의한 처리율 검토

Fig. 1은 모래를 aluminum hydroxide와 iron-aluminum hydroxide로 각각 코팅한 것과 코팅을 안한 것간의 pH변화에 따른 zeta potential의 변화를 본 것이다. 코팅한 경우가 중성 pH에서 zeta potential이 양(+)이 됨을 알 수 있으며 zeta potential 이 양(+)에 근접할수록 column test에서 virus 제거효율이 증가

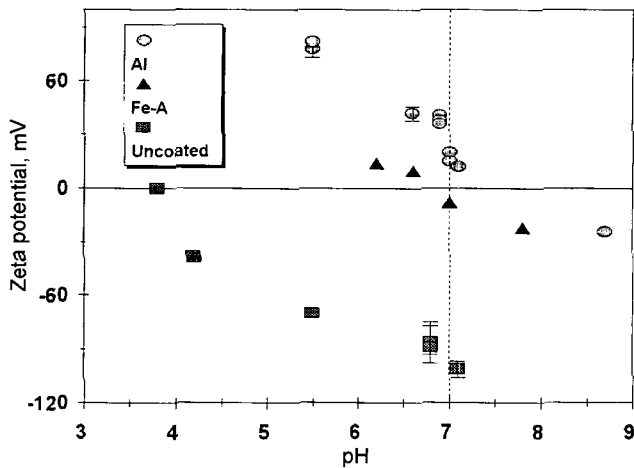


Fig. 1. Effect of coating on surface charge.

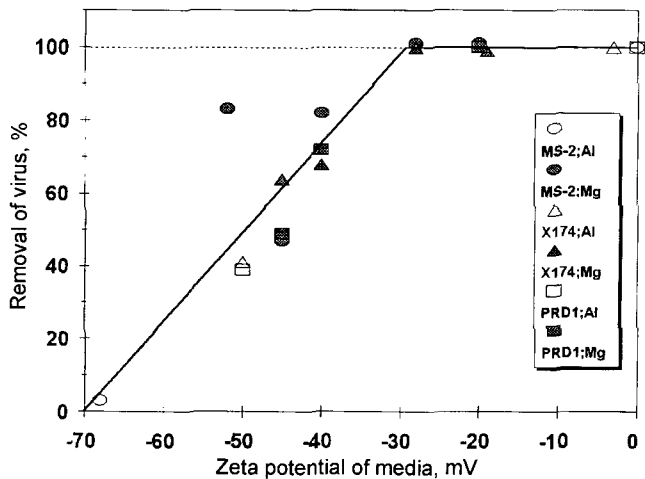


Fig. 2. Removal of virus at different electrokinetic potentials.

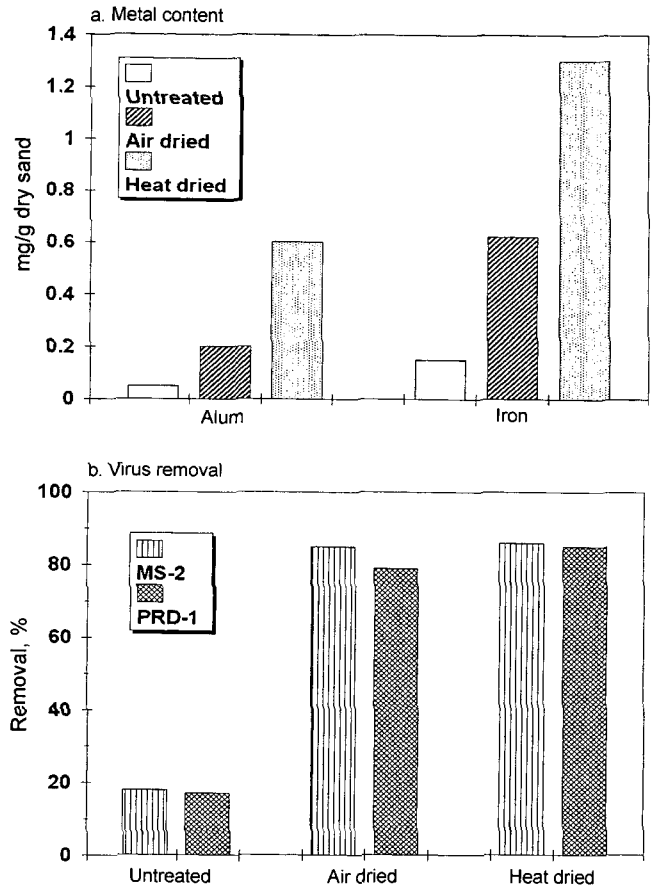


Fig. 3. Metal content (a) and virus removal (b) for different air and heat drying.

하였다(Fig. 2). 또한, 코팅방법으로 air drying한 것과 heat drying한 것간에는 금속염 축적 정도가 많은 차이를 보였고, 바이러스 등 부유물의 제거효율은 heat drying 한 경우가 85% 이상으로 air drying한 경우보다 약간 높게 관찰되었는데(Fig. 3), 이는 여러 연구자들의 결과에서도 말해주듯이 heat drying 한 경우에 바이러스 제거율이 80~90%로 air drying 한 경우 75~83% 보다 높게 관찰됨을 알 수 있었다(Onorato and Tien, 1980; Zerda et al., 1985; Van der Mei et al., 1993; Mills et al., 1994; Bales et al., 1995). 따라서, 모래를 금속염으로 코팅 할 경우가 안한 경우 보다 음이온을 띤 부유물 제거에 탁월한 효능이 있음을 알 수 있었다. 이는 기존의 모래를 금속염 처리한 것과 교환할 경우 보다 부유물 제거효율이 증진됨을 의미하는 것이다. 따라서 양식장의 순환되는 사육수를 재이용할 경우에 여과시스템의 기능을 향상시켜 각 어종에 맞는 적정 수질조건을 유지하는 기술 개발이 선행되어야 하겠으며, 이때 여과 과정을 거친 순환수는 여과과정에 의한 부유성 고형물만 제거되어서는 아니 된다. 그러므로 보다 효과적이고 안전한 양식을 위해서는 부유성 고형물뿐만 아니라 병원성 미생물의 제거를 위하여 모래를 코팅한 후 상향류식 연속 역세 여과(DynaSand)의 재료로 사용하면 양어장 순환수의 수질정화에 효과적이고 또한 질병에 대

한 피해도 어느 정도 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

pH에 따른 여과재료의 흡착 실험

본 실험에서 이용된 여과재료는 non-coating, Al coating, Fe coating 및 Al+Fe coating 모래이었다. 표면 전하는 매체와 입자의 화학적 구성요소에 따라 여러 가지 요인에 의해 생기게 되며, 이때 입자의 표면이 전기를 띠게 되면, 상반되는 전기를 가진 이온들(counter ions)이 표면에 붙게 된다. 이 이온들은 열역학적 교란보다 큰 정전기적인 힘과 van der Waals 힘에 의해 계속 붙어 있게 된다. 여과재료의 표면특성이 coating에 의하여 화학적인 변화를 시킴에 따라 수중에 있는 대부분의 음이온화된 물질을 흡착시킬 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

흡착 실험에서 사용된 폐수는 합성시료를 이용하였으며 이때의 농도와 탁도는 각각 10 mg/L와 2.55 NTU이었다. 초기 pH 4.22에서 흡착 실험한 결과는 Fig. 4와 같다.

여과재료를 non-coating한 것이 coating한 것에 비하여 흡착되는 정도가 약한 것을 알 수 있으며, 제거효율면에서도 Al coating이 가장 효과적이었다. 그러나, Fe coating의 경우 제거효율은 non-coating 경우보다 감소되는 것을 볼 수 있는데 이

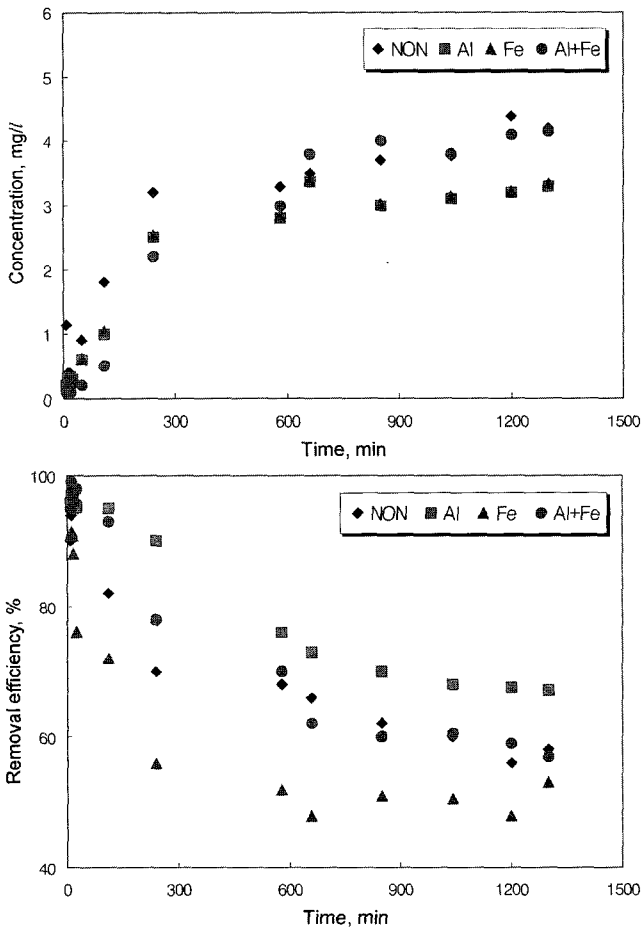


Fig. 4. Temporal changes in the concentration of synthetic water and removal efficiency of columns systems at pH 4.22.

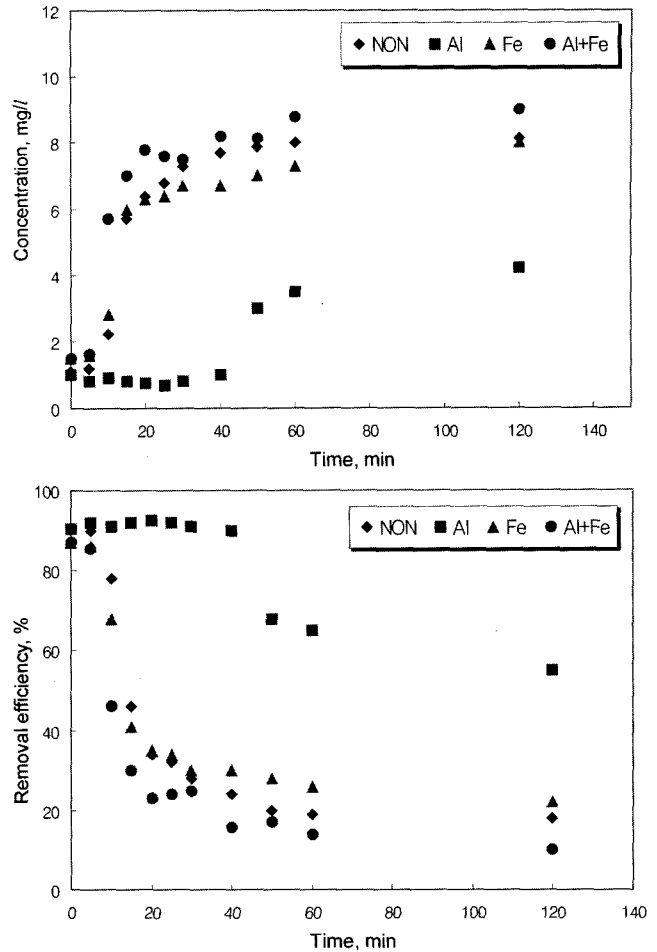


Fig. 5. Temporal changes in the concentration of synthetic water and removal efficiency of columns systems at pH 5.12.

것은 pH가 낮을 경우 coating된 Fe이 떨어지기 때문으로 사료된다. 탁도의 경우 실험 시작 초기에서부터 농도가 증가하였으며 제거효율도 급격히 감소하였다. Al coating의 경우 지속시간 11 시간 이후부터 약간 증가하였고 알칼리도는 초기에 10 mg CaCO₃/L이었으며 이후 점차로 감소하였다. 유입수를 초기 pH 5.12로 조정하여 실험한 결과는 Fig. 5와 같다. 초기에 증가되는 합성 시료의 농도는 Al coating의 경우가 가장 느리게 변화하는 것을 알 수 있었다. 또한, non-coating, Fe coating 및 Al+Fe coating의 경우 농도의 변화유형이 비슷하게 관찰되었으며, pH 5.12에서의 제거효율은 Al coating이 가장 효과적인 것으로 나타났다. pH 7.58에서 실험한 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 실험에서 알 수 있듯이 non-coating과 Fe coating은 반응 시간 초기에 급격하게 농도가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 Al coating과 Al+Fe coating은 반응 시간 30 분까지 효과적으로 흡착이 일어나는 것을 볼 수 있었으며, 이 후의 반응시간에서 파과 곡선형태를 보여주고 있다. 중성 근처의 pH에서도 Fe coating보다 Al과 Al+Fe coating이 더 효과적인 것을 알 수 있었는데 이는 Onorato and Tien(1980)의 결과와 유사하였다. 제거 효율

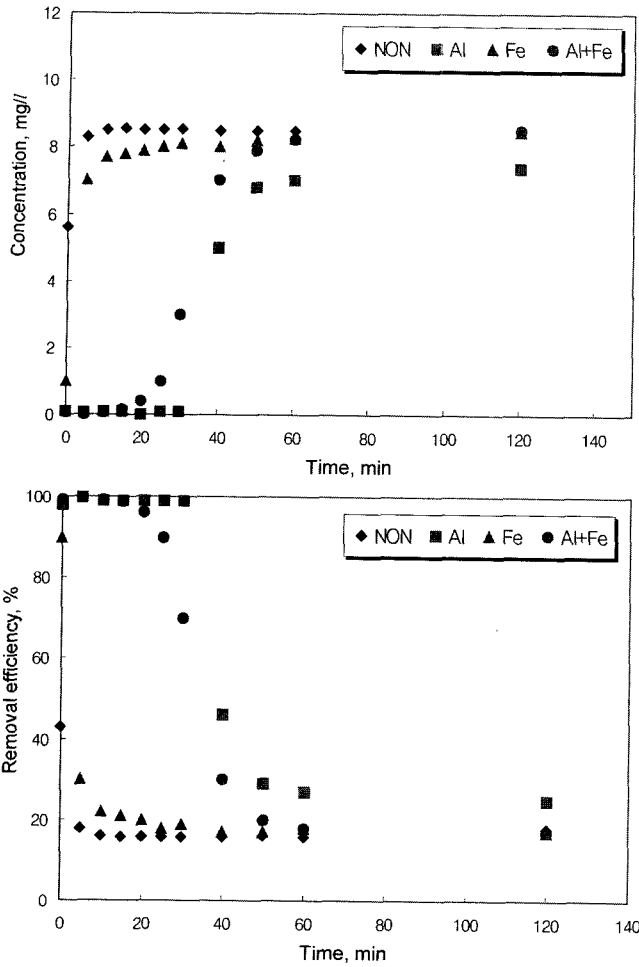


Fig. 6. Temporal changes in the concentration of synthetic water and removal efficiency of columns systems at pH 7.58.

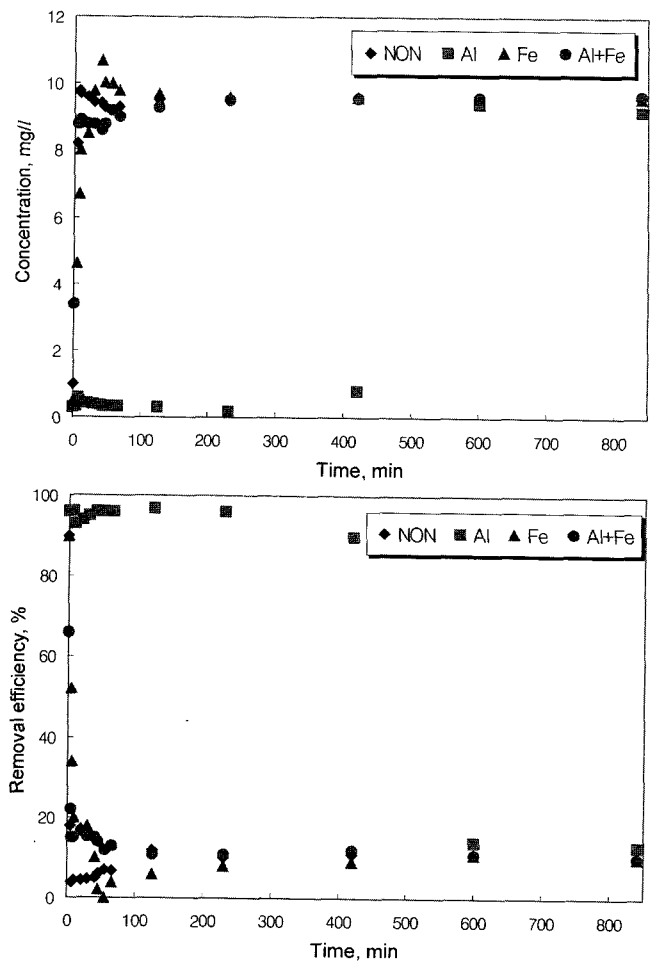


Fig. 7. Temporal changes in the concentration of synthetic water and removal efficiency of columns systems at pH 10.04.

은 약 30분 이내에서 90%가 제거되었고 탁도의 경우 초기 반응 시간에서 Al과 Al+Fe coating의 경우 60% 이상의 제거 효율을 보였으며, 이후 약 40%로 감소하였다. pH 10.04에서의 실험 결과는 Fig. 7에 나타내었다. pH가 산성 및 중성에서의 실험 결과와 다르게 Al coating의 경우 흡착 지속 시간이 약 8시간까지 지속되는 것을 알 수 있었고, 이 때의 제거효율은 95% 이상이었다. 반면에 다른 컬럼의 결과는 반응 초기부터 급격히 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 탁도의 경우는 다르게 Al coating 한 경우가 초기에 더 높게 관찰되었고 파과 곡선 이후에는 비슷하게 관찰되었으며, 제거 효율은 약 40%이었다. pH 10.04에서 알칼리도의 변화는 반응 초기에 급격히 증가하여 약 25 mg CaCO₃/L를 나타냈다.

여과재료의 재흡착 실험

재흡착 실험은 pH 7.55에서 흡착 실험을 하고 pH 4.4인 증류수를 이용하여 탈착시키고 난 후 다시 pH 7.55에서 재흡착 실험을 하였다. 이의 결과는 Fig. 8에 나타내었다. pH 7.55에서의 재흡착 실험의 경우 초기에 급격하게 농도가 증가하였으며

이에 따른 제거 효율도 약 20%정도로 유지되었다. 이와는 반대로 Al+Fe coating의 경우 초기 60%이상의 제거 효율에서 40%까지 감소하였다가 다시 증가하는 것으로 나타났다.

Sheer and Harris(1982)에 의하면 Al에 노출될 경우 어류의 생리상태에 영향을 주어 독성을 유발시킨다고 보고하였다. 철과 알루미늄의 독성은 중성에서 보다 산성이나 알칼리성에서 더욱 강하게 나타난다고 보고되었으며(Brate et al., 1984), U. S. EPA(1971)에 의하면 하천이나 호소중에 알루미늄이 0.1~0.2 mg/L의 농도로 용존될 경우 어류에 대하여 독성을 나타낸다고 한다. pH에 따른 Al과 및 Fe의 존재 형태는 중성 범위에서 용해도가 가장낮다(Cornwell and Bishop, 1983). Letterman은 pH 변화에 따른 다핵 수산화알루미늄(polynuclear aluminum hydroxide, Al_p(OH)_q^{(3p-q)+})의 생성과 가수분해 그리고 침전과 용해 현상은 pH의 상승과정(base titration)과 후속된 강하과정(acid titration)이 서로 다른 곡선을 나타낸다는 사실을 밝혔다(Letterman et al, 1973). 이는 이미 형성된 수산화 알루미늄은 pH가 낮아진다 하여도 쉽게 용해되지 않기 때문이다. 이때 Al_p(OH)_q^{(3p-q)+}의 OH/Al 비는 q/p로 나타내지며 이 값은 산성과 중성의 범위

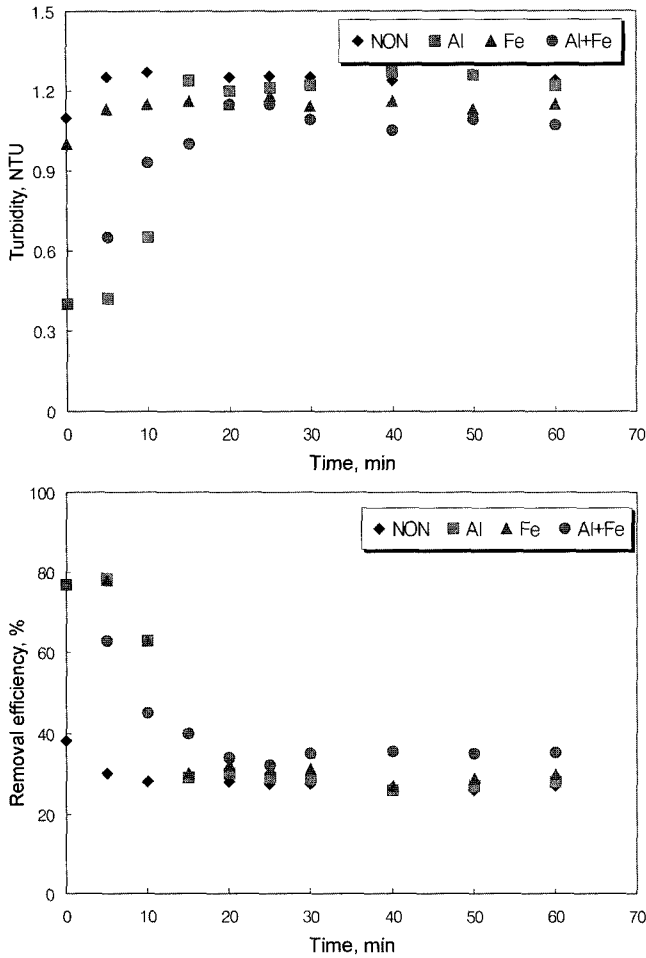


Fig. 8. Temporal changes variation in turbidity of synthetic water and removal efficiency on columns system at pH 5.12.

(pH4~9)에서 pH가 증가함에 따라 증가되고 q/p 비가 2.6~2.8 이상이 되면 침전물을 형성한다.

Brate 등(1984)에 의하면 어류에게 직접적인 영향을 미치지 않는 pH 범위는 5.0~9.0 범위로 알려졌다. 따라서 양어장 적정 pH 범위가 6.5~8.5 범위인 것을 고려할 때, 모래를 철과 알루미늄으로 코팅할 경우 이들의 어류에 대한 독성의 영향은 미비할 것으로 판단되나 만성적인 노출과 중금속축적에 대한 연구는 계속 진행되어야 할 것으로 사료된다.

여과재료를 이용한 탈착 실험

위의 실험에서 사용된 여과재료를 이용하여 탈착 실험을 하였다. 실험에 이용된 coating 모래는 흡착 실험을 하고 난 후의 여과재료를 이용하였다. 탈착 실험은 회분식 형태로 운영하였으며 각각의 실험은 pH 4.10, 5.23, 7.10, 8.32, 9.95 및 11.00에서 수행하였다. 실험 결과는 Fig. 9와 10에 나타내었다. Non, Al, Fe 및 Al+Fe coating 모두에서 pH 9.95에서 용출(leaching) 되는 농도가 가장 높았으며 각각의 농도는 7.47, 4.80, 20.89 및 7.23 mg/L이었다. 전체 여과재료의 경우에서 pH 7~10 사이에

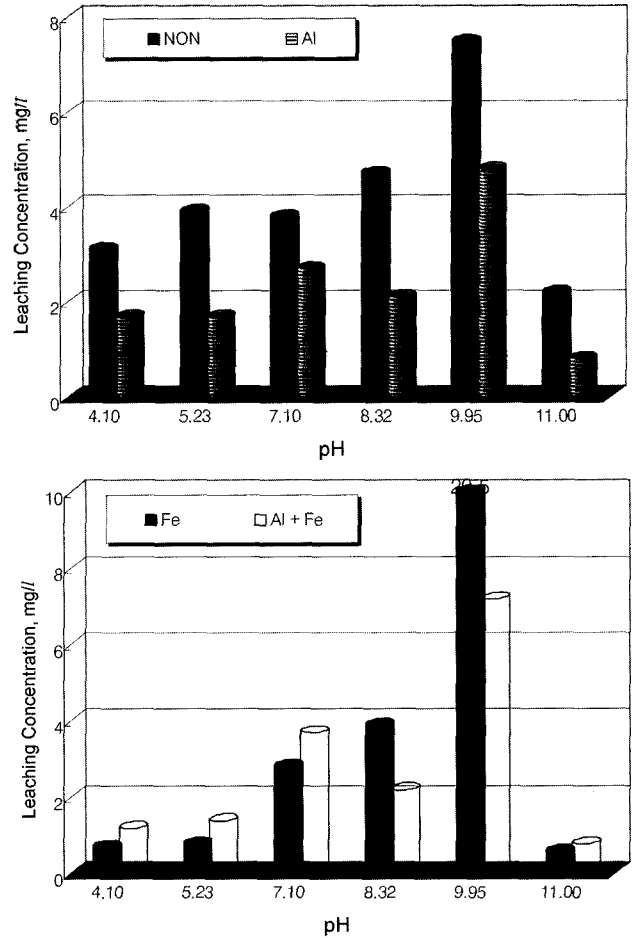


Fig. 9. Temporal changes in leaching concentration of synthetic water on batch system.

서 용출되는 농도가 높았으며 이 범위를 벗어남에 따라 감소하였다. Non-coating 경우 각 pH에 따른 용출 농도가 coating의 경우에 비하여 높았다. 그리고 pH 11.00에서 용출되는 농도가 가장 낮았다. 탁도의 경우 용출되는 농도와는 다른 형태를 보여주고 있다. Non-coating에서 pH 5.23에서 가장 높은 2.64 NTU를 나타냈으며 다른 pH에서는 일정한 것으로 나타났다. Al coating의 경우 pH에 따른 영향은 거의 나타나지 않았으며, pH가 증가함에 따라 약간 감소하는 것을 알 수 있었다. Fe coating에서는 pH의 영향이 없었으며, Al+Fe coating에서는 pH가 증가함에 따라 탁도도 역시 일정하게 증가하는 것으로 나타났다.

요 약

본 연구에서는 상향류식 연속 역세여과 연구를 통하여 양어장 순환수 처리 후 박테리아 및 바이러스 등을 효과적으로 처리하는 기술 개발과 여과사에 금속염을 코팅시켜 생물막의 형성을 도모하는 연구를 수행하였다. 여과사를 코팅한 경우 중성 pH에서 zeta potential이 양(+)이 됨을 알 수 있었고 zeta potential이 양(+)에 근접할수록 column test에서 바이러스 제거효율이

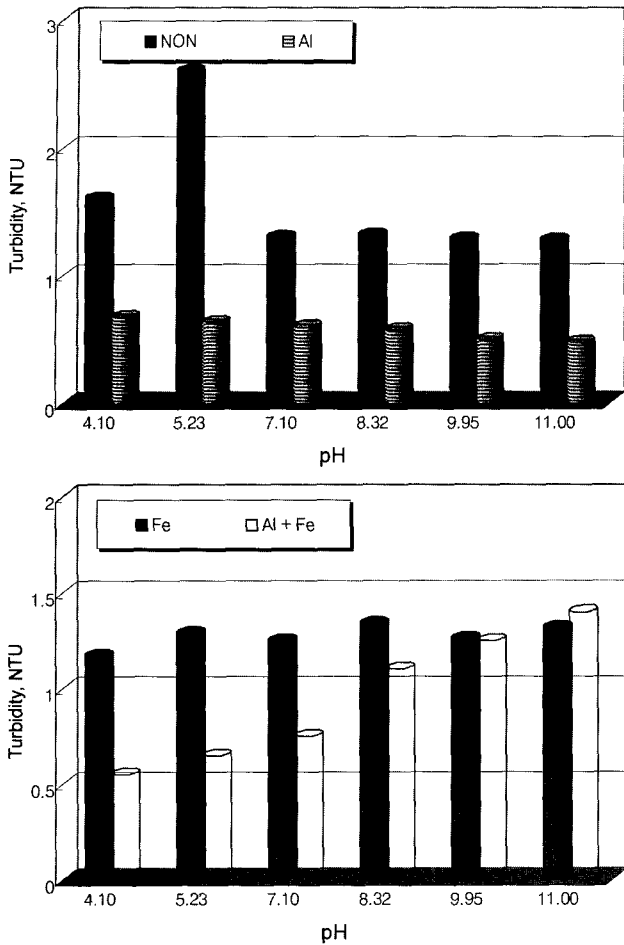


Fig. 10. Temporal changes in turbidity of synthetic water on batch system.

증가함을 알 수 있었다. 따라서 여과사를 금속염으로 코팅을 하는 경우가 안한 경우 보다 음이온을 띤 부유물 제거에 탁월한 효능이 있음을 보여주었다.

pH에 따른 여과재료의 흡착율에서 Al coating과 Al+Fe coating은 반응 시간 30분까지 효과적으로 흡착이 일어나는 것을 볼 수 있었고 이 후의 반응시간에서 파과 곡선형태를 보여주었다.

회분식 형태로 운영한 여과재료를 이용한 탈착실험에서 Non, Al, Fe 및 Al+Fe coating 모두에서 pH 9.95에서 용출(leaching)되는 농도가 가장 높았으며 각각의 농도는 7.47, 4.80, 20.89 및 7.23 mg/L로 각각 나타났다.

이번 연구에서 Al coating의 경우 pH에 따른 영향은 거의 나타나지 않았으며, pH가 증가함에 따라 약간 감소하는 것을 알 수 있었고 Fe coating에서는 pH의 영향이 없었으며, Al+Fe coating에서는 pH가 증가함에 따라 탁도도 역시 일정하게 증가하는 것으로 나타났다.

참고문헌

AHPA., 1989. Standard methods for the examination of water and

- wastewater. 18th edition, AWWA and WPCF.
- Bales, R. C., S. R. Hinkle, T. W. Kroeger, K. Stocking and C. P. Gerba, 1991. Bacteriophage adsorption during transport through porous media: chemical perturbation and reversibility. pp. 103–1024.
- Bales, R. C., S. Li, K. M. Maguire, M. T. Yahya, C. P. Gerba and R. W. Harvey, 1995. Virus and bacteria and transport in a sandy aquifer. Cape Cod, MA, Ground Water, **33**: 653–661.
- Brate, M. H., 1984. Treatment of acid mine water discharging into the tar creek watershed. Proceeding of the 39th Industrial Waste Conference, Purdue University, pp. 201–203.
- Cornwell, D. A. and M. M. Bishop, 1983. Determining velocity gradient in a laboratory and full scale systems. J. AWWA., **75**: 470–475.
- EPA U. S., 1971. Acid mine drainage formation and abatement. Washington, D. C., USA, pp. 60.
- Farrah, S. R., and D. R. Preston, 1991. Adsorption of virus by diatomaceous earth coated with metallic oxides and metallic peroxides. Wat. Sci. Tech., **24**: 235–240.
- Fontes, D. E., A. L. Mills, G. M. Homberger and J. S. Herman, 1991. Physical and chemical factors influencing transport of microorganisms through porous media. Appl. Environ. Microbiol., **57**: 2473–2481.
- Gerba, C. P., K. Hou and M. D. Sobsey, 1988. Microbial removal and inactivation from water by filters containing magnesium peroxide. J. Environ. Sci. Health, **23A**: 41–58.
- Harvey, R. W., N. E. Kinner, A. Bunn, D. MacDonald and D. Metge, 1995. Transport behavior of groundwater protozoa and protozoan-sized microspheres in sandy aquifer sediments. Appl. Environ. Microbiol., **61**: 209–217.
- Ho, G. E., R. A. Gibbs and K. Mathew, 1991. Bacteria and virus removal from secondary effluent in sand and red mud columns. Wat. Sci. Tech., **23**: 261–270.
- Jenneman, G. E., M. J. McNemey and R. M. Knapp, 1985. Microbial penetration through nutrient-saturated berea sandstone. Appl. Environ. Microbiol., **50**: 383–391.
- Jewell, W. J. and R. J. Cummings, 1990. Expanded bed treatment of complete recycle aquaculture system. Wat. Sci. Tech., **22**(1/2): 443–450.
- Kim, I. B. 1980. Pilot scale fish production in water recycling system. J. Korean Fish Soc., **13**(4): 195–205. (in Korean)
- Lee, B. H., H. C. Kim and J. S. Kim, 1999. Water treatment recirculating aquaculture culture system by using three phase fluidized bed reactor. Spring Joint Meeting of the Korean Societies on Fisheries Science, pp. 359–360. (in Korean)
- Lee, B. H., H. Choi and J. S. Ryu, 2000. Water treatment of seawater recirculating aquaculture culture system by using three phase fluidized bed reactor. J. Aquaculture, **13**(2): 137–145. (in Korean)
- Letterman, R. D., J. E. Quon and R. S. Gemmel, 1973. Influence of rapid-mix parameters on flocculation. J. AWWA., **65**: 716–722.
- Lichtenberg, D., M. Rosenberg, N. Sharfman and I. Ofek, 1985. A kinetic approach to bacterial adherence to hydrocarbon. J. Microbiol. Methods, **4**: 141–146.
- Loder, T. C. and P. S. Liss, 1985. Control by organic coatings of the surface charge of estuarine suspended particles. Limnol.

- Oceanogr, **30**: 418–421.
- Manz, W., M. Wagner, R. Amann and K. H. Schleifer, 1994. In situ characterization of the microbial consortia active in two wastewater treatment plants. *Wat. Res.*, **28**: 1715–1723.
- Marshall, K. C., 1976. Interfaces in microbial ecology. Harvard University Press, Cambridge, MA and London, England, 55 pp.
- McCaulou, D. R., R. C. Bales and J. F. MaCarthy, 1994. Use of short-pulse experiments to study bacteria transport through porous media. *J. Contam. Hydrol.*, **15**: 1–14.
- McCaulou, D. R., R. C. Bales and R. G. Arnold, 1995. Effects of temperature-controlled motility on transport of bacteria and microspheres through saturated sediments. *Water Resour. Res.*, **31**: 271–280.
- McCoy, W. F. and B. H. Olson, 1985. Fluorometric determination of the DNA concentration in municipal drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.*, **49**: 811–817.
- Mills, A. L., J. S. Herman, G. M. Hornberger and T. H. DeJesus, 1994. Effect of solution ionic strength and iron coatings on mineral grains on the sorption of bacterial cells to quartz sand. *Appl. Environ. Microbiol.*, **60**: 3300–3306.
- Nijhof, M. and J. Bonverdeur, 1990. Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculating fish culture system. *J. Aquacult.*, **87**.
- Oh, S. Y., J. Y. Jo and I. B. Kim, 1997. Denitrification of synthetic wastewater in submerged biofilter. *J. of Aquaculture*, **10**(3): 335–346. (in Korean)
- Oh, S. Y., J. Y. Jo and G. H. Yoon, 1999. Optimum conditions for the removal external organic carbon sources in a submerged denitrification biofilter. *J. of Aquaculture*, **12**(1): 47–56. (in Korean)
- Onorato, F. J. and C. Tien, 1980. The effect of surface interaction on particle deposition. *Chem. Eng. Commun.*, **7**: 363–376.
- Rogers, G. L. and S. L. Klemetson, 1985. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. *Aquacult. Eng.*, **4**: 135–154.
- Scholl, M. A. and R. W. Harvey, 1992. Laboratory investigation on the role of sediments surface and groundwater chemistry in transport of bacteria through a contaminated sandy aquifer. *Environ. Sci. Technol.*, **26**: 1410–1417.
- Sheer, D. P. and D. C. Harris, 1982. Acidity control in the north branch potomac. *J. of WPCF.*, **54**(11): 1441–1446.
- Stenkamp, V. S. and M. M. Benjamin, 1994. Effect of iron oxide coating on sand filtration. *J. AWWA.*, **86**: 37–50.
- Van der Mei, H. C., J. de Vries and H. J. Busscher, 1993. Hydrophobic and electrostatic cell surface properties of thermophilic dairy *Streptococci*. **59**: 4305–4312.
- Zerda, K. S., C. P. Gerbra, K. C. Hou and S. M. Goyal, 1985. Adsorption of viruses to charge-modified silica. *Appl. Environ. Microbiol.*, **49**: 91–95.

원고접수 : 2002년 10월 1일

수정본 수리 : 2003년 1월 7일

책임편집위원 : 강주찬